

中华人民共和国地质矿产部

地质专报

三 岩石矿物 地球化学 第4号

中国变质作用

及其与地壳演化的关系

董申保等

地质出版社

中华人民共和国地质矿产部

地质专报

三 岩石 矿物 地球化学 第4号

中国变质作用及其与
地壳演化的关系

董 申 保 等

地质出版社

前 言

变质作用是地壳形成和发展过程中一种重要的地质作用。近年来世界各时代变质地区的地质研究表明,变质作用的特点和类型与区域地壳演化和大地构造环境有密切关系。以变质相和相系为基本内容的小比例尺变质地质图的编制,对于这方面的研究具有重要意义。1967年以来,世界上已有四十余个国家和地区相继完成了小比例尺的变质地质图。这些图件反映了近代变质地质学的研究成果,为变质作用与大地构造环境之间的成因联系及区域变质成矿作用提供了基础资料。

我国各时代变质岩系分布广泛,具有各种不同的变质作用类型,反映了地壳发展不同阶段的特点,变质矿产也很丰富。多年来的区域地质调查和找矿工作积累了丰富的资料,华北等地区近年来还开展了一系列富有成果的专题科研工作,这些都为编制中国变质地质图及进行变质地质学方面的总结提供了可靠的依据。

1980年以来,在有关上级部门的支持下,开展了中国变质地质图(1:4000000)的编制与研究工作。该项目由长春地质学院(牵头单位)、地质矿产部地质研究所和天津地质矿产研究所三单位负责组织和具体统编。先后参加协作的有23个省(区)地质矿产局等单位。各省在统一的编图原则下分工负责本省(区)的1:2000000变质地质图及说明书。关于编图过程、组织分工等情况已在中国变质地质图(1:4000000)说明书中进行了叙述,此处从略。

全国变质地质图编图委员会编图组(简称编图组,下同)在各省区提交的变质地质图及说明书的基础上,并结合近几年的研究工作,统编了《1:4000000中国变质地质图》及中、英文说明书。说明书中仅简要地介绍了编图原则、方法、图例说明,并对编图的主要结论作了初步论述。

为了对中国各地区变质作用的特点进行较系统的总结,对与变质作用有关的中国地壳演化进行比较深入的探讨,由全国编图组成员在统编全国变质地质图的基础上进行综合研究,编写了本书。

本书在变质相和变质相系研究的基础上,强调变质作用类型和变质旋回的研究,进行了变质地质单元的划分,并简要阐述了各变质地区的变质岩系和变质作用特征及其与地壳演化的关系,试图从变质作用所反映的热流的时空变化特点来探讨大地构造和地壳演化的某些规律。此外还根据编图中的大量实际材料,对变质地质学的某些重要问题作了一些探讨。它与说明书组成一个有机的整体。而本书在更多方面侧重于实际材料的引证、归纳和总结及有关专题的较深入探讨。本书写成后由董申保和沈其韩进行了审核和修改,贺高品和迟洪兴作了统一整理和编辑加工。卢良兆在初稿统编及全书定稿过程中作了很多工作。由于编者水平所限,且编写时间仓促,因此在归纳总结、综合分析等方面都还存在着若干问题,敬请读者给予指正。

此项目进行过程中,得到了地质矿产部、各省(区)地质矿产局及各编图单位领导和有关同志的大力支持。书中还引用了一些未公开出版或个人口头提供的资料。长春地质学

院前寒武纪地质研究室负责人曾竹林为此项目作了大量组织工作，李耀光等翻译了许多与编图有关的国外资料。在此一并致谢。

中国地质学会理事长、中国变质地质图（1:4000000）编图指导程裕淇教授关怀并指导了本书的编写；长春地质学院院长张贻侠教授对本书的及时完成给予了大力支持和帮助。在此对他们表示衷心感谢。

最后还应感谢世界变质带编图分会主席兹瓦特（H·J·Zwart）教授对我国变质地质图编制和研究工作给予的热情支持和协助。

目 录

第一篇 概 述

第一章 变质相和相系的划分 (卢良兆、迟洪兴)	(1)
第二章 变质作用类型的划分 (卢良兆)	(7)
第三章 变质作用期次的划分 (卢良兆)	(15)
第四章 变质地质单元的划分 (叶挺松)	(17)

第二篇 各变质地质单元的基本特征

第一章 天山-兴安古生变质地区 (贺高品、叶挺松、张寿广、郑松彦、 庄育勋)	(23)
第一节 阿尔泰-天山亚区	(23)
第二节 内蒙-兴安亚区	(38)
第三节 变质作用与地壳演化	(50)
第二章 华北太古-早元古变质地区 (吴昌华、李树勋、高吉凤、徐学纯)	(53)
第一节 华北亚区	(57)
第二节 阴山亚区	(76)
第三节 胶辽亚区	(78)
第四节 淮阳亚区	(85)
第五节 花岗质岩石及其与变质作用的关系	(87)
第六节 变质作用与地壳演化	(88)
第三章 塔里木-阿拉善元古变质地区 (贺高品、张寿广)	(90)
第一节 塔里木亚区	(92)
第二节 阿拉善亚区	(95)
第三节 变质作用与地壳演化	(97)
第四章 柴达木-祁连-北秦岭元古-早古生变质地区 (张寿广、魏仪芳、 贺高品)	(98)
第一节 柴达木-祁连亚区	(98)
第二节 北秦岭亚区	(104)
第三节 变质作用与地壳演化	(113)
第五章 昆仑-巴颜喀拉-唐古拉晚古生-早中生变质地区 (阎鸿铨、贺高品、 张寿广)	(115)
第一节 昆仑-巴颜喀拉亚区	(117)
第二节 唐古拉-滇南亚区	(125)

第三节	花岗质岩石及其与变质作用的关系	(128)
第四节	变质作用与地壳演化	(128)
第六章	西藏中、新生变质地区 (刘国惠、郭沪滇).....	(130)
第七章	高喜马拉雅-滇西元古-古生变质地区 (刘国惠、冯本智).....	(138)
第一节	高喜马拉雅亚区 (刘国惠).....	(139)
第二节	滇西亚区 (冯本智).....	(143)
第八章	扬子元古变质地区 (冯本智、张树业、贺同兴、叶慧文、魏仪芳).....	(150)
第一节	扬子亚区	(151)
第二节	扬子北缘亚区	(163)
第三节	花岗质岩石及其与变质作用的关系	(167)
第四节	变质作用与地壳演化	(168)
第九章	华南元古-古生变质地区 (贺同兴、叶慧文、张兴洲)	(170)
第一节	华南亚区	(170)
第二节	闽浙东部亚区	(178)
第三节	华南及闽浙东部亚区的花岗岩及其与变质作用的关系	(179)
第四节	华南及闽浙东部亚区的变质作用与地壳演化	(180)
第五节	海南亚区	(181)
第十章	东南沿海-台湾中、新生变质地区 (贺同兴、叶慧文、张兴洲)	(185)
第一节	福建沿海亚区	(185)
第二节	台湾亚区	(190)

第三篇 变质作用与地壳演化的几个问题

第一章	有关中国变质作用的几个问题	(195)
第一节	麻粒岩相及麻粒岩相型变质作用 (李树勋、吴昌华、高吉凤、徐学纯).....	(195)
第二节	早前寒武纪地质问题的讨论 (孙大中).....	(197)
第三节	蓝闪石片岩相变质作用 (叶慧文、卢良兆、张树业).....	(199)
第四节	混合岩化及花岗质岩浆作用 (贺同兴).....	(203)
第五节	同位素年龄方面的有关问题 (沈其韩).....	(206)
第六节	变质矿床与变质含矿建造 (阎鸿铨、魏仪芳).....	(209)
第二章	中国的变质作用与地壳演化 (董申保).....	(214)
第一节	变质地质单元与大地构造环境的关系	(214)
第二节	变质旋回与地壳演化	(215)
第三节	变质作用所反映的中国大地构造演化	(221)
结论		(224)
主要参考文献		(226)
附: 矿物代号		(231)
后记		(232)

Contents

Part I Introduction	(1)
Chapter I Principles of Compilation of the Metamorphic Map of China and Its Legend Used (Lu Liangzhao, Chi Hongxing)	(1)
Chapter II Types of Metamorphism (Lu Liangzhao)	(7)
Chapter III Metamorphic Epoch (Lu Liangzhao)	(15)
Chapter IV Metamorphogenic Unit (Ye Tingsong)	(17)
Part II Basic Features of Each Metamorphogenic Units.....	(23)
Chapter I Tianshan-Hinggan Palaeozoic Metamorphic Domain (He Gaopin, Ye Tingsong, Zhang Shouguang, Zheng Songyan, Zhuang Yuxun)	(23)
1. Altay-Tianshan Sub-domain.....	(23)
2. Nei Mongol (Inner Mongolia) -Hinggan Sub-domain.....	(38)
3. Metamorphism and Crustal Evolution.....	(50)
Chapter II North China Archaean-Early Proterozoic Metamorphic Domain (Wu Changhua, Li Shuxun, Gao Jifeng, Xu Xuechun)	(53)
1. North China Sub-domain	(57)
2. Yinshan Sub-domain.....	(76)
3. Jiao-Liao Sub-domain	(78)
4. Huaiyang Sub-domain	(85)
5. Granitic Rocks and Their Relations with metamorphism.....	(87)
6. Metamorphism and Crustal Evolution	(88)
Chapter III Talim-Alxa Proterozoic Metamorphic Domain (He Gaopin, Zhang Shouguang)	(90)
1. Talim Sub-domain.....	(92)
2. Alxa Sub-domain.....	(95)
3. Metamorphism and Crustal Evolution	(97)
Chapter IV Qaidam-Qilian-Northern Qinling Proterozoic-Early Palaeozoic Metamorphic Domain (Zhang Shouguang, Wei Yifang, He Gaopin)	(98)
1. Qaidam-Qilian Sub-domain.....	(98)
2. Northern Qinling Sub-domain	(104)
3. Metamorphism and Crustal Evolution	(113)
Chapter V Kunlun-Bayan Har-Tanggula Late Palaeozoic-Early Mesozoic Metamorphic Domain (Yan Hongquan, He Gaopin, Zhang Shouguang)	(115)

1.	Kunlun-Bayan Har Sub-domain	(117)
2.	Tanggula-Southern Yunnan Sub-domain	(125)
3.	Granitic Rocks and Their Relations with Metamorphism	(128)
4.	Metamorphism and Crustal Evolution	(128)
Chapter VI	Xizang (Tibet) Mesozoic-Neozoic Metamorphic Domain (Liu Guohui, Guo Huqi)	(130)
Chapter VII	High Himalaya-West Yunnan Proterozoic-Palaeozoic Metamorphic Domain (Liu Guohui, Feng Benzhi)	(138)
1.	High Himalaya Sub-domain(Liu Guohui).....	(139)
2.	Western Yunnan Sub-domain(Feng Benzhi)	(143)
Chapter VIII	Yangtze Proterozoic Metamorphic Domain (Feng Benzhi, Zhang Shuye, He Tongxing, Ye Huiwen, WeiYifang)	(150)
1.	Yangtze Sub-domain	(151)
2.	Northern Yangtze Sub-domain	(163)
3.	Granitic Rocks and Their Relations with Metamorphism.....	(167)
4.	Metamorphism and Crustal Evolution	(168)
Chapter IX	South China Proterozoic-Palaeozoic Metamorphic Domain (He Tongxing, Ye Huiwen, Zhang Xingzhou)	(170)
1.	South China Sub-domain	(170)
2.	Eastern Fujian-Zhejiang Sub-domain	(178)
3.	Granites and Their Relations with Metamorphism.....	(179)
4.	Metamorphism and Crustal Evolution.....	(180)
5.	Hainan Sub-domain.....	(181)
Chapter X	Southeastern Coast-Taiwan Mesozoic-Neozoic Metamorphic Domain (He Tongxing, Ye Huiwen, Zhang Xingzhou)	(185)
1.	Fujian Coast Sub-domain.....	(185)
2.	Taiwan Sub-domain.....	(190)
Part II	Some Problems Concerning the Metamorphism and crustal Evolution	(195)
Chapter I	Some Problems About the Metamorphism in China	(195)
1.	Granulite Facies and metamorphism of Granulite-Facies Type (Li Shuxun, Wu Changhua, Gao Jifeng, Xu Xuechun)	(195)
2.	Discussion on Early Precambrian Geological Problems (Sun Dazhong)	(197)
3.	Glaucophane-Schist Facies Metamorphism (Ye Huiwen, Lu Liangzhao, Zhang Shuye)	(199)
4.	Migmatization and Granitic Magmatism (He Tongxing)	(203)
5.	Problems of geochronology in the metamorphic Map (Shen Qihan)	(206)
6.	Metamorphic Ore Deposit and Ore-bearing Formation (Yan Hongquan, Wei Yifang)	(209)

Chapter II	Metamorphism and Its Relation with the Crustal Evolution of China (Dong Shenbao)	(214)
1.	Relation between Metamorphogenic Unit and Tectonic Setting	(214)
2.	Metamorphic Cycle and Crustal Evolution.....	(215)
3.	Crustal Evolution of China, Related to Metamorphism.....	(221)
Conclusion		(224)
References		(226)
Appendix: Mineral Symbols		(231)
Epilogue		(232)

ABSTRACT

This book mainly deals with the basic features of metamorphism and their relation with the tectonic setting and the crustal evolution in China. It aims at the discussions concerning the temporal-spatial distribution of metamorphic facies, metamorphic facies series, as well as the classification of the types of metamorphism and the subdivision of metamorphogenic units according to their definite assortment of metamorphic types. An elaboration of metamorphic mega-cycles based on the relevant distribution of metamorphogenic units is reviewed in regard to their tectonic setting, and a tentative scheme of crustal evolution related to the internal change of heat flow pattern causing the metamorphism is also discussed.

Owing to the brevity of the explanatory text of the Metamorphic Map of China (1:4 000 000), this book is mainly devoted to the elucidation of factual observations documented in the explanatory text of the provincial metamorphic map which has been contributed by the working group of the provincial geological bureau listed in the Epilogue. It is hoped that it may act as a complementary work of the explanatory text of the Metamorphic Map of China in order to help the readers to understand more details about the compilation of the Metamorphic Map.

第一篇 概 述

变质作用^①是地壳形成及演化过程中的一种重要地质作用，它们广泛出现于各地质时代的活动区（带），其发生可能与下部地壳和上地幔的热流变化有关。在一个变质地带中，变质作用的发生和发展具有较长的过程，它包括：

1. 变质作用的起始状态——主要是原岩建造的特征及其形成时的大地构造环境。
2. 变质作用的进行状态——主要表现为变质相和相系以及变形的特征。
3. 变质作用的终了及后继状态——主要是混合岩化及花岗质岩浆作用的特征。

其中变质相和相系类型及其时空分布特征是变质作用研究的基本内容，通过它们可反映各时代不同变质地区的热流值及其分布特征和变化规律。区域性混合岩化作用是变质作用的继续和发展，大部分花岗质岩浆作用和区域变质作用有成因联系，它们的出现及其特征和变质作用类型及大地构造环境有密切关系，所以也是变质地区地质研究的重要内容。原岩建造及其形成时的大地构造环境则是研究变质地区地质发展史的重要依据。

在地壳的不同演化阶段及不同的大地构造环境中可出现不同的变质作用类型，它们具有不同的变质相、相系以及与变质作用有关的构造作用和花岗质岩浆作用的组合特征。出现不同变质作用类型的根本原因，可能与地壳下部及上地幔热流变化的不同特点有关。

根据变质时期和变质作用类型可区分出不同级别的变质地质单元。通过研究变质作用类型的时空变化规律，可得出各变质地区的变质旋回特征。通过这些特征可以探讨变质作用与地壳演化的联系。

变质地质图是反映地壳演化过程中变质作用特征及其时空变化规律的专门性图件。编制变质地质图的主要目的是了解各变质地区的变质作用特征和发展历史以及当时地壳中热流值的变化情况，并进一步从变质作用这一侧面来阐明地壳演化和大地构造发展方面的某些规律。

第一章 变质相和相系的划分

变质相和相系是变质作用研究的主要内容，通过它们可以反映变质作用的物理化学条件及地质环境。

一、变质相和相组

根据埃斯科拉的定义和近代研究的结果，一个变质相是自然界一系列不同成分的原岩在一定 $p-t$ 范围内，经变质作用形成的一套矿物共生组合。它们彼此紧密共生，基本处于

^①指区域变质作用。

平衡状态,矿物成分和原岩化学成分之间有着规律性的对应关系。并可在不同变质地区、不同地质时代重复出现,相互之间可以对比。每一变质相都有自己的特征矿物组合,与相邻变质相之间可以用特定的临界反应相区分。变质相组是指形成于一定温度区间,而压力条件不同的一组变质相。在不能区分压力条件时,相组就相当于只代表温度高低的经典变质相。在 $p-t$ 图上,这些相组的界线大致和压力轴平行,彼此间以等温线为界。

关于变质相的划分方案和彼此区分的标志以及每一变质相的进一步划分等问题,目前的意见还不完全一致,本文的划分方案见表1。

表1 各变质相组及变质相的划分和对比
Table 1. Division and correlation of metamorphic facies and facies group

变 质 相		特征矿物和常见矿物	变质区间
亚绿片岩相	浊沸石相和葡萄石-绿纤石相	浊沸石、葡萄石、绿纤石	250—350℃
	(蓝闪石片岩相)	蓝闪石、硬柱石、硬玉	
绿片岩相	蓝闪绿片岩相	蓝闪石、白云母、帘石、绿泥石、(阳起石)	350—500℃
	低绿片岩相	钠长石/更长石、绿泥石、绿帘石、阳起石	
	绿泥石级	绿泥石-绢云母±雏晶黑云母	
	二云母级	黑云母-白云母	
角闪岩相	高绿片岩相	铁铝榴石、硬绿泥石、黑云母、白云母	500—700℃
	低角闪岩相	十字石、蓝晶石/红柱石、堇青石、石榴石、黑云母、白云母	
麻粒岩相	高角闪岩相	矽线石+钾长石、铁铝榴石、角闪石、黑云母	>700℃
	麻粒岩相	紫苏辉石、单斜辉石、铁铝榴石±棕色角闪石±黑云母	

1. 亚绿片岩相——相当于温克勒分类中的极低级变质,其中包括浊沸石相、葡萄石-绿纤石相和蓝闪石-硬柱石片岩相。浊沸石相属于变质作用的最初始阶段,常与成岩作用有过渡关系,葡萄石-绿纤石相温度稍高,两者经常伴生,彼此不易区分,在我国各地常共同出现。蓝闪石-硬柱石片岩相则属于低温高压类型。

2. 蓝闪石片岩相

一般文献中的蓝闪石片岩相属于低温高压范围,在低温变质岩(一般为变质的硬砂岩和基性岩)中可出现变质成因的蓝闪石、青铝闪石到镁钠闪石系列的矿物,主要的共生矿物可有绿泥石、帘石、白云母(多硅白云母)、黑硬绿泥石、红帘石及绿纤石、硬柱石等。中国变质地质图编图中的研究表明这类岩石可划分为两个变质相:

(1) 蓝闪石-硬柱石片岩相。稳定矿物组合为蓝闪石-硬柱石-钠长石或硬玉,还可含绿泥石和绿纤石,其温度范围大致为250—350℃,低于绿片岩相,属于亚绿片岩相组的高压相。

(2) 蓝闪绿片岩相。其常见的稳定矿物组合为蓝闪石-帘石-绿泥石-白云母，或含青铝闪石和阳起石，有时可出现石榴石。温度一般相当于绿片岩相，最高可达500℃。它们常与绿片岩相岩石共生，在其中呈带状分布。因此应属绿片岩相组的高压相。它们在中国分布较广，其物理化学条件及地质环境与蓝闪石-硬柱石片岩相不完全相同，故应加以区分。

3. 绿片岩相

绿片岩相属于低温变质相，相当于温克勒分类中的低级变质，以基性岩中出现钠长石+帘石+绿泥石±阳起石为特征。稍高温时还可出现角闪石或铁铝榴石。绿片岩相和亚绿片岩相之间的标志性矿物变化是绿纤石或硬柱石转变为黝帘石。

绿片岩相可进一步划分为低绿片岩相和高绿片岩相，前者相当于泥质变质岩中的绢云母-绿泥石带和黑云母带，后者相当于铁铝榴石带。

低绿片岩相又可分为绢云母（雏晶黑云母）-绿泥石级和黑云母级。前者在中国的一些变质地带呈大面积分布，岩石类型以千枚岩和板岩为主，它们组成一种变质作用类型，并具有一定的地质意义。

高绿片岩相相当于变质泥质岩石中的铁铝榴石带。在基性岩中以普通角闪石+帘石+斜长石为特征组合，相当于有些文献中的绿帘角闪岩相。对这个相的地位目前认识仍很不一致。一般认为它处于角闪岩相与绿片岩相之间的过渡地位。据近年来的实验资料，十字石的出现可作为角闪岩相和绿片岩相之间的界线。因此，将铁铝榴石带划为高绿片岩相。

4. 角闪岩相

角闪岩相属于中温到中高温变质相，相当于温克勒分类中的中级变质作用类型。在基性岩中以普通角闪石+斜长石为典型组合，泥质岩石中则以出现十字石、堇青石、红柱石或蓝晶石和矽线石等矿物为特征。根据实验资料，它和绿片岩相之间的临界矿物变化是十字石或堇青石（没有共生铁铝榴石）的形成或硬绿泥石的消失。

角闪岩相可进一步划分为两部分。低角闪岩相相当于十字石-蓝晶石带或十字石-红柱石带，高角闪岩相相当于矽线石-钾长石带。因为矽线石还可由云母在混合岩化作用过程中转变形成，因此常需要辅助性的标志，如高角闪岩相条件下，基性变质岩角闪石常显棕黄色多色性，斜长石成分为中基性，伴生的大理岩中可出现硅灰石等等。高角闪岩相在我国太古代和早元古代变质地区有一定分布。

5. 麻粒岩相

关于麻粒岩相的范围目前仍有不同理解，一般都以出现二辉石或紫苏辉石为标志，但常有角闪石和黑云母与之共生，有时斜长角闪岩与紫苏辉石麻粒岩还可成互层产出。我国内蒙集宁群中富含矽线石和石榴石等矿物的片麻岩，因部分含有二辉石组合的夹层，也应属于麻粒岩相。此外，华北变质地区常见有单斜辉石-石榴石-斜长石的组合，它们出现于角闪岩相占优势的地区时，因目前尚无确切的资料，暂不当成麻粒岩相处理。至于大面积斜长角闪岩出露地区偶见含紫苏辉石的岩石，更不易确定其为麻粒岩相，这些问题只能留待进一步研究。

此外，关于榴辉岩，按照近来的认识，它虽具有绿辉石+富钙的镁铝榴石为特征的高压矿物组合，但具有多种地质成因，可出现于麻粒岩相、角闪岩相直到蓝闪石片岩相的条件下，且一般规模不大，因此不构成独立的变质相。

二、变质相系

按照都城秋穗 (1961) 的概念, 在一个变质地区范围内, 温度和压力在空间上的变化幅度常较大, 因此其所形成的变质矿物组合, 不能用一个变质相来代表。即在单一变质相的地区内, 由于温度的变化也往往可形成一系列的变质带, 因此每一变质地区都应有其特征的变质相系列, 反映特定的温度-压力梯度及其变化范围, 这些特征又决定于该区的地壳发展特点和大地构造条件。关于变质相系的分类, 本文基本采用都城秋穗的方案, 但根据近来的国内外研究资料, 将中压相系和低压相系的地热梯度界线定为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

1. 低压相系: 红柱石-矽线石型, $>30^{\circ}\text{C}/\text{km}$;
2. 中压相系: 蓝晶石-矽线石型, $10-30^{\circ}\text{C}/\text{km}$;
3. 高压相系: 硬玉-蓝闪石型, $<10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

考虑到十字石可形成于各种压力条件, 无指示意义, 故将堇青石-红柱石及十字石-红柱石组合均归于低压相系。只将平衡共生的蓝晶石-红柱石和蓝晶石-堇青石组合归为中低压相系过渡型。此外, 我国有些变质地带内, 同一变质时期在不同地段可分别出现红柱石及蓝晶石, 但二者之间没有明显的界线可以分别圈定, 它们可能因处于不同的构造深度或由于先后的热流值不同所致。由于目前研究不够, 暂也做为过渡相系处理。至于在以某一种相系为主的地区, 只零星出现另一种相系的特征矿物时, 则认为全区仍属于这一种主要相系。

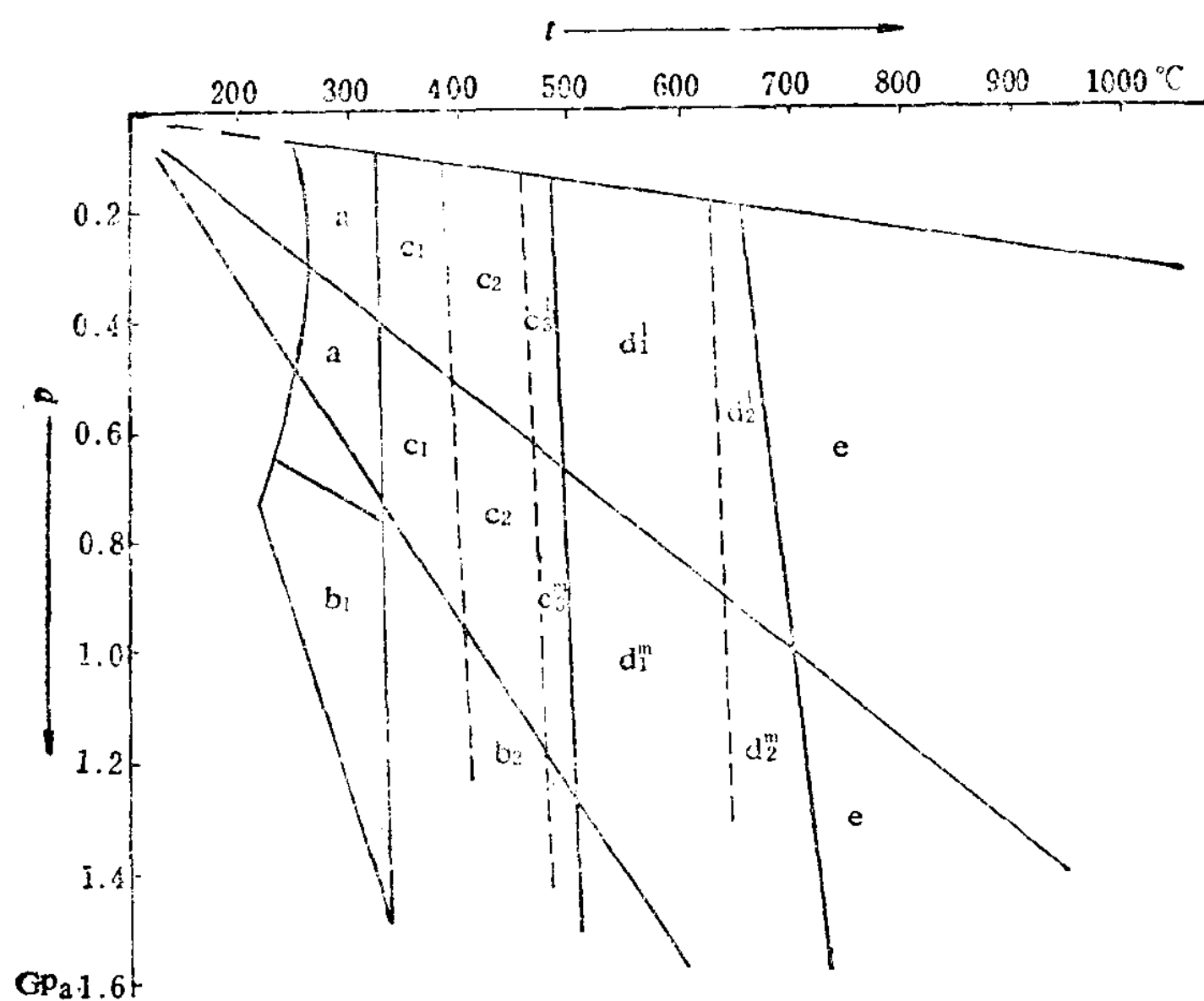


图1 变质相及相系的 $p-t$ 图解

Eig. 1 The $p-t$ diagram of the metamorphic facies and facies series

a—浊沸石相和葡萄石-绿纤石相; b_1 —蓝闪石-硬柱石片岩相; b_2 —蓝闪绿片岩相; c_1 —低绿片岩相 (绢云母-绿泥石级); c_2 —低绿片岩相 (黑云母级); c_3 —高绿片岩相; d_1 —低角闪岩相; d_2 —高角闪岩相; e—麻粒岩相;
m—中压相系; l—低压相系

表2 变质相组和相系的矿物及矿物组合

Table 2. Minerals and mineral assemblages of metamorphic facies and facies series

相组及相系			特征矿物及矿物组合	不出现的矿物及矿物组合	常见的矿物及矿物组合	备 注
蓝绿片岩相组	浊沸石相和葡萄石-绿纤石相		浊沸石+石英、葡萄石+绿纤石	方沸石+石英、片沸石	绿泥石、白色云母、钠长石、钾长石、高岭石、蒙脱石	葡萄石-绿纤石相中有绿帘石
	蓝闪石-硬柱石片岩相		蓝闪石、青铝闪石、硬柱石、文石、硬玉+石英		黑硬绿泥石、多硅白云母、绿泥石、绿帘石、钠长石、绿纤石	
绿片岩相组	低绿片岩相	低压及中压相系	绢云母、绿泥石、绿帘石、黝帘石、钠长石、锰铝榴石	浊沸石+石英、绿纤石、葡萄石、蓝闪石、铁铝榴石、普通角闪石	黑云母、白云母、黑硬绿泥石、阳起石、蛇纹石	绢云母-绿泥石级中有雏晶黑云母，无黑云母及锰铝榴石
	高绿片岩相	低压及中压相系	铁铝榴石、普通角闪石+绿帘石	锰铝榴石、绢云母、黑硬绿泥石、十字石、蓝晶石	白云母、黑云母、绿帘石、斜长石	有时可出现红柱石
	蓝闪绿片岩相	(高压绿片岩相)	青铝闪石(或镁钠闪石、蓝闪石)+黝帘石+白云母、青铝闪石+阳起石		绿泥石、红帘石、黑硬绿泥石、硬玉质辉石、石榴石	蓝闪石可能出现在较高温度、有时有榴辉岩共生，可含有硬柱石
角闪岩相组	低角闪岩相	低压相系	红柱石、白云母+石英、普通角闪石(黄绿色)	蓝晶石、矽线石+钾长石、硅灰石	黑云母、白云母、堇青石、十字石、透闪石、透辉石	有与云母在一起的矽线石。混合岩化作用形成
	中压相系	中压相系	蓝晶石、十字石、白云母+石英、普通角闪石(蓝绿色)	红柱石、堇青石、矽线石+钾长石、硅灰石、蓝闪石、	黑云母、白云母、铁铝榴石(少)、透闪石、透辉石	有与云母在一起的矽线石
	高角闪岩相	低压相系	矽线石+钾长石、硅灰石、普通角闪石(棕黄色)	十字石、蓝晶石、白云母	黑云母、堇青石、斜方角闪石、透辉石、橄辉石、铁铝榴石	铁铝榴石出现较少
	中压相系	中压相系	矽线石+钾长石、普通角闪石(棕黄色)	十字石、红柱石、白云母	黑云母、铁铝榴石、透辉石、橄辉石	
麻粒岩相组			斜方辉石±单斜辉石、矽线石+钾长石	十字石、白云母	石榴石、黑云母、普通角闪石、蓝晶石、堇青石	黑云母、普通角闪石可与之共生

关于以蓝闪石和蓝晶石共生为特征的高压过渡型相系，我国尚未发现。我国的蓝闪绿片岩相属于绿片岩相组的高压相，一部分可能是介于中压和高压的过渡型。

必须指出，中国一些变质期出现较大面积的绿片岩相、角闪岩相或麻粒岩相的单相变质，甚至其内部也不能划分变质带，因此不属于变质相系范围。由于绿片岩相和麻粒岩相的单相变质地带一般缺少能说明其压力类型的特征矿物，太古代的角闪岩相单相变质地区，有时由于原岩成分限制，也无特征矿物，因此本文在研究这些变质地区时，只考虑其可能的变质作用 $p-t$ 条件，不划分变质相系类型。

各变质相组及变质相系在 $p-t$ 图中的分布见图1。

各变质相组和变质相系的重要矿物组合见表2。

第二章 变质作用类型的划分

一、基本概念和划分依据

近年来的研究表明,区域变质作用这一概念过于广泛。它们既大面积出现于前寒武纪的不同时期,形成各种克拉通,也普遍存在于各时代的活动带及其它地区,其特征各不相同。为了更好地研究变质作用的物理化学条件及其与地质背景的关系,必须进一步划分变质作用类型。这方面近年来已有一些研究和总结,如都城秋穗(1961)关于日本双变质地带的研究;库姆斯(Coombs, 1961)和温克勒(1976)关于埋深变质的概念等。索勃列夫(Sobolev, 1982)和多勃列佐夫(Dobretsov, 1981)等人通过苏联和亚洲变质地质图的编制,也在变质作用类型方面作了较系统的总结。

变质作用是地壳形成和发展过程中出现的一种重要的内生作用,是由于深部地壳包括部分地幔与上部地壳相互作用时产生的热流所引起的。变质作用的成因类型决定于变质作用发生和发展的全过程,包括变质作用起始时的大地构造环境及其形成的原岩建造,变质作用进行时热流和应力场变化所反映的物理化学条件和应力的特征,以及变质作用终了阶段出现的混合岩化作用和花岗质岩浆作用的特点。在地壳演化的不同阶段及不同的大地构造背景下,变质作用本身的物理化学条件和应力变形以及伴生的构造作用和岩浆作用都可有不同的特征和不同的组合关系,结果就形成了不同的变质作用类型。划分变质作用类型的依据首先是变质作用本身的特征,即变质相和相系及其空间分布特征;其次是与变质作用伴生的构造作用和花岗质岩浆作用的特征,同时还应考虑变质作用起始时的大地构造环境及原岩建造特征。

1. 变质相和相系的类型及其空间分布状态

变质相和相系的类型是反映一个地区变质作用时达到的温压范围、地热增温率或热流上升的速度。因此,它们是衡量一个变质地带当时热流值、地热梯度和热流来源的一个重要标志。这在文献中已有大量论述。另一方面变质相的空间分布特征能反映当时温度和热流在空间上的分布状态,这对推断热源也有重要意义。不同地区变质作用强度及其所反映的温度的空间变化特点有所不同,近年来国内外的研究表明可分为两种不同的情况:

(1) 单相变质:是指一个变质地带由一个变质相组成。虽局部可有少量其它变质相的岩石,或在同一变质相内部各地段的变质强度稍有变化,但全区不能划分出递增变质带。单相变质在我国最常见的是大面积均匀分布的低绿片岩相以及早前寒武纪的麻粒岩相或角闪岩相。这种分布状态常常反映变质地带当时热流分布比较均匀,其热源前者可能是地壳加厚时所产生的放射性热能,后者除放射性热能外,还有地幔的重力分异热能。

(2) 多相变质:是指一个变质地带由两个以上的主要变质相组成,它们表现为明显的带状或穹窿状递增变质的特征。这一特征反映当时热流分布是不均匀的,部分热流具有深部上升的特点,形成热轴或热点。递增变质带可有不同类型,一种是温度变化范围较大,可由绿片岩相一角闪岩相一麻粒岩相。不同地区出现的变质相范围、各个变质带的宽

度和规模都有差别,其部分热能来自地幔,由重力分异所产生。此外,还有一种是以压力变化为主所形成的递增变质带,如浊沸石相—葡萄石—绿纤石相—蓝闪石—硬柱石片岩相,它们的变质带较宽,温度变化较小,一般均属于亚绿片岩相组,热能大小可能受下沉时的深度所控制。

单相和多相变质是代表热源不同的变质相的空间分布特点,反映不同的地质环境,所以是划分变质作用类型的重要依据之一。但在自然界中有时可出现过渡情况,例如,有些具有递增变质作用的地区中,某一变质相分布很广,其它变质相分布区较窄(如华南加里东变质地带)。在有些单相变质地区,则在与区域变质作用有关的花岗岩体的接触带附近局部出现递增变质现象(如四川西部的印支变质地带)。这些情况可增进我们对变质作用过程的了解,但在划分时仍应依据其主要特征。

2. 与变质作用有关的构造作用及花岗质岩浆作用的特征

由于不同变质地区的大地构造环境不同,在其发展过程中,构造作用、花岗质岩浆作用的特征也不同,而且它们和变质作用的特征常有一定的规律性联系,是划分变质作用类型时应考虑的重要因素。

构造变形是变质作用的一个重要方面,不同变质地区变形作用的地位各不相同。例如埋深变质地区以低温变质为主,变形作用出现较少或属后期叠加性质;在一些低绿片岩相单相变质的活动带中,则往往变形作用所引起的片理化很强烈,且与低温的变质结晶作用同时发生;在另一些具有递增变质带的区域动力热流变质作用地区,则应力与温度起同样重要的作用,但两者的先后顺序可有各种不同的情况。上述应力和变形作用的强度及时空分布特征的不同,可能反映不同的地质环境。此外,应力的垂直方向的分压力,可增加由负荷所产生的压力,大的推覆构造也可形成超压(over pressure)。

区域性混合岩化和地壳深熔花岗岩(anatectic granite)(包括混合花岗岩和岩浆花岗岩)的出现及其演化往往是变质作用的继续和发展,在不同变质作用类型中,它们的出现与否、规模大小及成因类型各不相同,例如,在低压相系变质地带常常出现大量混合岩和花岗岩,有时可组成花岗岩系列(granite series);在单相的绿片岩相变质地带,常为同变质期(构造期)的岩浆花岗岩;而在高压相系变质地带则很少有花岗岩出现。

3. 大地构造环境

变质地区起始环境是地壳中具有活动性的下沉带,这种下沉带由于所处的大地构造位置及当时的地质环境不同,可出现不同类型的沉积岩系或火山岩系,形成不同的原岩建造。它们反映变质作用的起始状态,并影响其变质作用类型。

变质作用起始时的大地构造环境的恢复是一个比较困难的问题,目前资料又不够充分,但为了探讨变质作用与大地构造环境的联系,提出下列有关名词供参考。

(1) 大地构造位置(tectonic setting)

本文只应用一般通用的大地构造位置名词,常用名词及其含义如下:

1) 原生地壳(proto-crust)

指大面积分布的太古代活动地壳。它们当时尚无明显的陆台和地槽之分,原岩建造的类型较少,其时代暂定为2500Ma以前,代表地壳形成过程早期特定的大地构造环境。

2) 克拉通(craton)

指陆壳中某一变质时期后(一般为前寒武纪)出现的相对稳定的地块,如太古代末期